

المجال المعرفي الثاني

التحولات الطاقوية في الخلايا

تمهيد

لقد لاحظنا في الوحدات السابقة للمجال الأول أن تركيب البروتينات تحتاج إلى طاقة تتحصل عليها خلايا العضوية من جزيئات ال ATP وعندما تدخل في مختلف التخصصات مثل عمل الإنزيمات والنقل العصبي والدفاع عن العضوية والحركة ... تحتاج أيضا إلى طاقة.

فما مصدر هذه الطاقة؟ وكيف يتم تحويلها لتشكيل جزيئات ال ATP؟

تذكير بالمكتسبات القبلية:

يلخص المخطط التالي تدفق الطاقة الضوئية والتي مصدرها الشمس عبر الكائنات الحية انطلاقا من النباتات الخضراء التي تحولها إلى طاقة كيميائية كامنة بتركيب مادة عضوية تسمى السكريات (تركيب ضوئي)، وانتهاء بالحيوانات والتي تقوم بتحويل هذه الطاقة الكامنة إلى طاقة قابلة للاستعمال في شكل ATP (تنفس).

سنتناول بشكل تفصيلي مراحل هاتين الآليتين.

الشمس
الضوء
تركيب ضوئي
O_2
CO_2
H_2O
سكر الجلوكوز
O_2
نبات أخضر منتج
CO_2
H_2O
حيوان مستهلك
تنفس
حرارة ضائعة
طاقة مستعملة (ATP)

أولا: تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة (تركيب ضوئي):

يوضح الجدول الموالي بشكل تفصيلي مراحل وشروط هذه الظاهرة على المستوى الجزيئي :

المراحل	التفاصيل
1 إيضاح المظاهر الخارجية وشروط حدوثها	**تذكير بالمكتسبات القبلية:** تتمثل المظاهر الخارجية للتركيب الضوئي في أخذ ثاني أكسيد الكربون من الجو الخارجي وبالمقابل طرح الأكسجين. يرفق ذلك بتركيب السكريات. وتتم العملية في وجود الضوء واليخضور، وفق المعادلة التقليدية التالية: $6H_2O + 6CO_2 \xrightarrow[\text{يخضور}]{\text{ضوء}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$
2 المقر والبنية	البلاستيدات الخضراء غشاء التيلاكويد غشاء خارجي غشاء داخلي نظامان ضوئيان PSII T1 T2 T3 PSI T1 T2 كرية مذنبة نواقل الإلكترونات تجويف الكييس صفيحة تيلاكويد ستروما حبيبات الغرانا خلية نباتية

المقر والبنية

مفرد	Granum
جمع	Grana

يتبين من الشكل أن الخلية النباتية تتميز بوجود الصانعات الخضراء إلى جانب احتوائها على كل مكونات الخلية بما فيها الميتوكندري.
تتكون البلاستيدة الخضراء من غشائين: داخلي وخارجي. بداخلها انثناءات أفقية للأغشية (صفائح) تحصر بينها حبيبات الغرانا. تتكون كل حبيبة غرانوم من مجموعة من كييسات متراكبة يسمى كل منها تيلاكويد.

- ما فوق بنية التيلاكوييد

يتكون غشاء التيلاكوييد من النظامين الضوئيين PSI و PSII يحصران بينهما سلسلة نواقل الالكترونات تنتهي بكرية مذنبة تعرف ب ATPase. تسمى هذه العناصر الغشائية في مجملها **السلسلة التركيبية الضوئية**.

3 معادلة التركيب الضوئي

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow[\text{يخضور}]{\text{ضوء}} C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

يمكن أن نستخلص من المعادلة وجود تفاعلين:
1- تفاعل أكسدة للماء حيث يتفكك إلى بروتونات وإلكترونات وأكسجين يطرح إلى الخارج.
2- تفاعل إرجاع لغاز الفحم إلى جلوكوز. فالعملية تتطلب امتصاص غاز الفحم من الوسط الخارجي.
أي أن طبيعة التفاعلات الكيميائية في التركيب الضوئي هي تفاعلات **أكسدة وإرجاع**.
تشترط المرحلة الأولى وجود الضوء واليخضور، لذلك تسمى المرحلة الضوئية أو الكيموضوئية. أما المرحلة الثانية فتشترط غاز الفحم دون الحاجة إلى الضوء لذلك تسمى المرحلة الظلامية أو الكيموحيوية.

4 مراحل التركيب الضوئي

أ- تفاعلات المرحلة الكيموضوئية

يوضح المنحنى التالي نتائج تجارب مدعمة بالحاسوب لمعلق التيلاكوييد معرض للضوء و الظلام وضع فيه كاشف الفيروسيانور كمستقبل للالكترونات (يكون بلون بني محمر في الحالة المؤكسدة، وبلون أخضر في الحالة المرجعة). حيث نلاحظ زيادة كمية الأكسجين المنطلق بزيادة كمية الفيروسيانور في وجود الضوء.

- لكن ما علاقة الأكسجين المنطلق بإرجاع الفيروسيانور؟

- مصدر الأكسجين المنطلق:

نبين ذلك من خلال تجربة هيل الشهيرة: وضع معلق الكلوريلا في وسطين أحدهما يحتوي على CO_2 ذي أكسجين مشع بينما الماء غير مشع، والوسط الثاني يحتوي على H_2O ذي أكسجين مشع بينما CO_2 غير مشع. نتائج هذه التجارب موضحة في الجدول:

الوسط	الجزيئ المشع	الأكسجين المنطلق
الأول	CO2	غير مشع
الثاني	H2O	مشع

يتبين من خلال هذه النتائج أن مصدر الأكسجين هو الماء. وعليه فإن إرجاع الفيروسيانور يتم بتحلل الماء إلى أكسجين وبروتونات وإلكترونات تعمل على إرجاع الفيروسيانور كما يلي:

$$2H_2O + 4Fe^{+++} \longrightarrow 4Fe^{++} + O_2 + 4H^+$$

- دور الضوء واليخضور:

يتكون النظام الضوئي من الأصبغة اليخضورية وهي A و B وأشباه الكاروتين و هي تنتظم في شكل اصبغة هوائية و مركز التفاعل.
تلتقط الأصبغة الهوائية الفوتونات التي تعمل عل تهييج أول صبغة P1 تنتقل فيها الالكترونات من مستوى أدنى إلى مستوى أعلى. عند عودة الإلكترون إلى مستواه الأول تتحرر طاقة تنتقل إلى الصبغة المجاورة P2 فتتهيج بدورها بنفس الكيفية. وهكذا تندلع سلسلة من التهيجات على مستوى هذه الأصبغة الهوائية إلى أن تصل الطاقة إلى زوج نهائي من الأصبغة يسمى **مركز التفاعل** حيث بعد تهييجها يتحرر إلكترونين كما يبينه الشكل المقابل:

مراحل التركيب الضوئي

وبما أن هناك نظامان ضوئيان في غشاء التيلاكويد فإن عملية التأكسد تتم على مستويين بالشكل التالي:

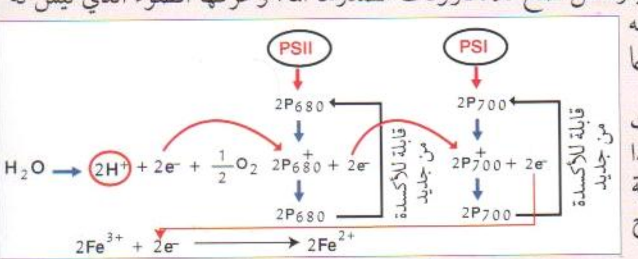
- مستوى **PSII** حيث يرمز فيها لصبغتي مركز التفاعل ب **2P 680** نسبة إلى أعلى موجة يمكن أن يمتصها هذا النظام.
- مستوى **PSI** حيث يرمز فيها لصبغتي مركز التفاعل ب 2P700 نسبة إلى أعلى موجة يمكن أن يمتصها هذا النظام.

إذن دور الضوء هو أكسدة اليخضور في النظامين الضوئيين.

لا يمكن للنظام الضوئي **PSII** أن يحرر الإلكترونات مرة ثانية بعد تاكسده إلا عند استعادة الإلكترونات التي فقدها وهذا لا يكون إلا عن طريق الالكترونات الناتجة عن تحلل الماء.

أما الإلكترونات المفقودة من طرف النظام الضوئي **PSI** فتعوض من الالكترونات القادمة من النظام الضوئي **PSII**.

بمعنى أن المرحلة الضوئية هي عبارة عن ضخ للالكترونات مصدرها الماء ومحركها الضوء الذي ليس له القدرة على أكسدة الماء ولكن له القدرة على أكسدة اليخضور كما يوضحه المخطط المقابل.



فاليخضور هو مصدر الإلكترونات المرجعة للفيروسيانور.لكن هذا المركب خارجي لا علاقة له بالخلية يستعمل في التجارب لإيضاح ظاهرة الأكسدة والإرجاع.

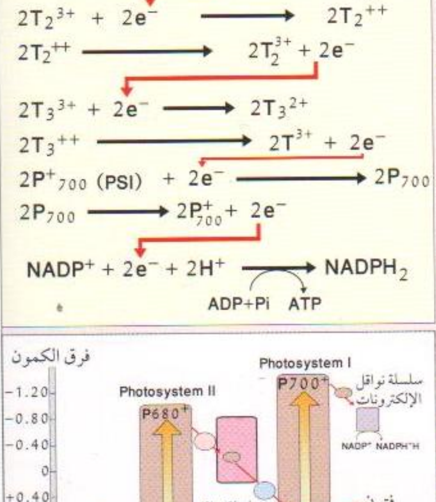
- ما هو المركب الحقيقي الذي يستقبل الإلكترونات المتحررة من اليخضور على مستوى التيلاكويد ؟

لقد أظهرت التجارب أن الإلكترونات تنتقل عبر سلسلة من النواقل تسمى السلسلة التركيبية الضوئية لتستقبل في النهاية من طرف مركب خاص يسمى+**NADP** كما يوضحه المخط التالي:

1- تنتقل الإلكترونات من النظام الضوئي **PSII** إلى النظام الضوئي **PSI** عبر سلسلة من النواقل (T1 و T2 و T3) وفق تدرج متزايد في كمون الأكسدة والإرجاع .

إن كمون الأكسدة والإرجاع للماء = 0.82 + ميللي فولت بينما كمون الأكسدة والإرجاع ل +**NADP** = 0.40 - ميللي فولت.بمعنى أن الماء لا يمكنه إرجاع $NADP^+$ ، وحتى تتم العملية كان من اللازم أكسدة النظامين الضوئيين ومن ثم إرجاعهما من طرف إلكترونات الماء وفق نظام انتقال الإلكترونات كما يلي:

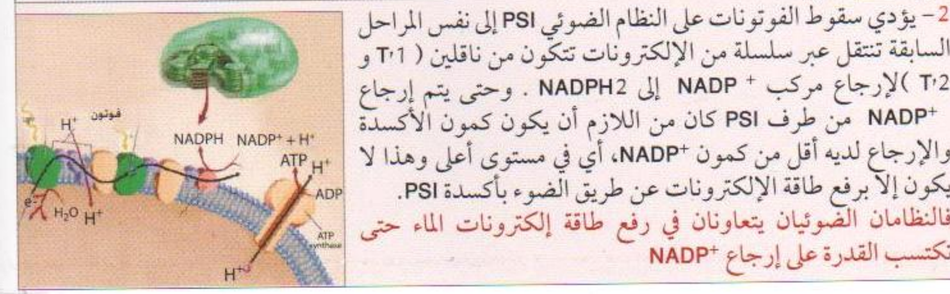
كمون أصغر (طاقته عالية) ⟵ كمون أكبر (طاقة منخفضة) كما يبينه شكل المخطط المقابل:



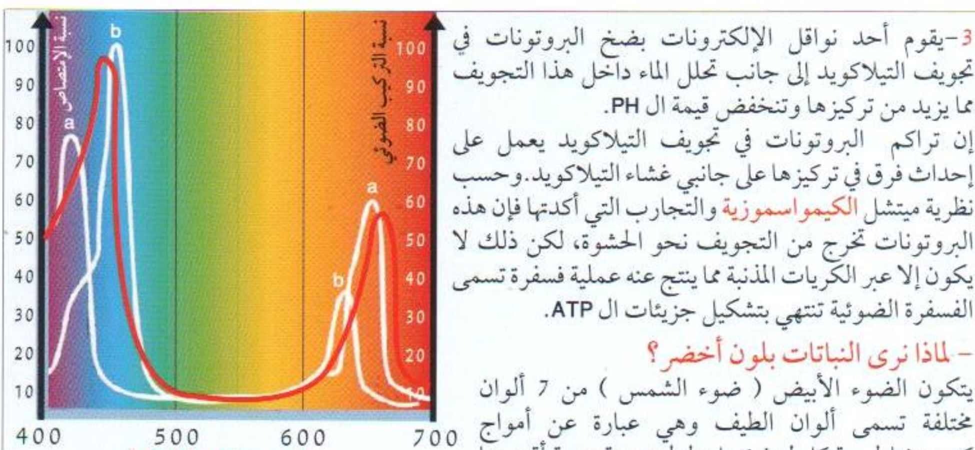
نلاحظ من المخطط أن الماء لا يمكنه إرجاع $NADP^+$ لكن بإمكانه إرجاع **PSII** لإن كمون الأكسدة والإرجاع لديه في مستوى أخفض من كمون الماء.

تعود أهمية نواقل الإلكترونات إلى امتصاص الطاقة العالية والناتجة عن الفرق في كمون الأكسدة والإرجاع بين الإلكترون المتحرر والنظام الضوئي ومن ثم استعمال هذه الطاقة المفقودة تدريجيا في ضخ البروتونات من الحشوة إلى تجويف التيلاكويد.

2- يؤدي سقوط الفوتونات على النظام الضوئي **PSI** إلى نفس المراحل السابقة تنتقل عبر سلسلة من الإلكترونات تتكون من ناقلين (T'1 و T'2)لإرجاع مركب $NADP^+$ إلى **NADPH2** . وحتى يتم إرجاع $NADP^+$ من طرف **PSI** كان من اللازم أن يكون كمون الأكسدة والإرجاع لديه أقل من كمون $NADP^+$، أي في مستوى أعلى وهذا لا يكون إلا برفع طاقة الإلكترونات عن طريق الضوء بأكسدة **PSI**.



فالنظامان الضوئيان يتعاونان في رفع طاقة إلكترونات الماء حتى تكتسب القدرة على إرجاع $NADP^+$



3-يقوم أحد نواقل الإلكترونات بضخ البروتونات في تجويف التيلاكويد إلى جانب تحلل الماء داخل هذا التجويف مما يزيد من تركيزها وتنخفض قيمة ال PH.
إن تراكم البروتونات في تجويف التيلاكويد يعمل على إحداث فرق في تركيزها على جانبي غشاء التيلاكويد.وحسب نظرية ميتشل الكيمواسموزية والتجارب التي أكدتها فإن هذه البروتونات تخرج من التجويف نحو الحشوة، لكن ذلك لا يكون إلا عبر الكريات المذنبة مما ينتج عنه عملية فسفرة تسمى الفسفرة الضوئية تنتهي بتشكيل جزيئات ال ATP.

- لماذا نرى النباتات بلون أخضر؟

يتكون الضوء الأبيض (ضوء الشمس) من 7 ألوان مختلفة تسمى ألوان الطيف وهي عبارة عن أمواج كهرومغناطيسية كل لون يحمل طول موجة معينة أقصرها البنفسجي والذي طول موجته 400 نانومتر ، وأطولها اللون الأحمر وطول موجته 700 نانومتر.يبين الشكل أعلاه منحنى نسبة امتصاص الألوان المختلفة من طرف اليخضور A وB فنلاحظ أنها تكون عالية في الألوان ذات الأمواج القصيرة (وهي البنفسجي والأزرق) و بنسبة أقل عند الموجات الطويلة (وهي البرتقالي والأحمر)، وشبه معدومة في اللون الأخضر. و يوضح المنحني باللون الأحمر نسبة التركيب الضوئي حيث هناك توازي مع منحنى الإمتصاص اي كلما زاد الإمتصاص زاد التركيب الضوئي و العكس صحيح.وهذا هو تفسير سبب رؤية أوراق النباتات بلون أخضر لأنها تعكسه ولا تمتصه. وبالتالي فأنت ترى شيئا بلون معين هذا يعني أنه امتص كل ألوان الطيف ماعدا ذلك اللون.ويمكن أن يكون لون الشيء مزيجا من لونين وهذا يعني بأنه لا يمتص اللونين معا.

حصيلة التفاعلات الكيموضوئية:

$$12H_2O + 12\ NADP^+ + 12(ADP + Pi) \longrightarrow 12\ NADPH2 + 12ATP + 6O_2$$

- ماهو مصير NADPH2؟

ب- تفاعلات المرحلة الكيموحيوية

على مستوى الحشوة أو ستروما تحدث سلسلة من التفاعلات يتم فيها إدماج CO_2 وإرجاع مركبات بينية عن طريق NADPH2 واستعمال طاقة ليتشكل في النهاية الجلوكوز. يتم إدماج 6 جزيئات من غاز الفحم ب 6 جزيئات لمركب خماسي يسمى Rudip (Ribulose 1.5-Diphosphate) لتعطي كمرحلة أولى 12 جزيئ PGA (حمض Phosphoglycerque) تتم فسفرته باستعمال ATP ثم إرجاعه عن طريق NADPH2 ليتشكل مركب PGal (Phosphoglyceraldehyde) كمرحلة ثانية حيث يكون عدد جزيئاته 12 بعدد 36 ذرة كاربون.وفي المرحلة الثالثة تندمج جزيئتان من PGal إلى جلوكوز، والباقي يندمج في شكل 6 جزيئات ريبيلوز أحادي الفوسفات.وفي المرحلة الرابعة والأخيرة يسترجع مركب Rudip من جديد لتستأنف الدورة مع 6 جزيئات CO2 أخرى. يطلق على العملية حلقة كالفن والتي يوضحها المخطط التالي.



حصيلة المرحلة الكيموحيوية:

كما لاحظنا سابقا إنها عملية إرجاع CO_2 لتركيب سكر الجلوكوز وهي تشترط وجود NADPH2 و ATPو CO_2

$$6CO_2 + 12\ ATP + 12\ NADPH_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 12\ (ADP + Pi) + 12\ NADP^+ + 6H2O$$

ما هي العلاقة بين المرحلتين؟

تشترط المرحلة الكيموحيوية وجود الضوء بطريق غير مباشر بمعنى وجود الضوء من أجل تزويدها ب: NADPH2 و ATP من المرحلة الكيموضوئية.
وكذلك فإن استمرار المرحلة الكيموضوئية مشروط باستمرار المرحلة الكيموحيوية لأن تراكم NADPH2 وعدم أكسدته يمنع من إرجاعه في السلسلة التركيبية الضوئية وبالتالي توقف العملية.

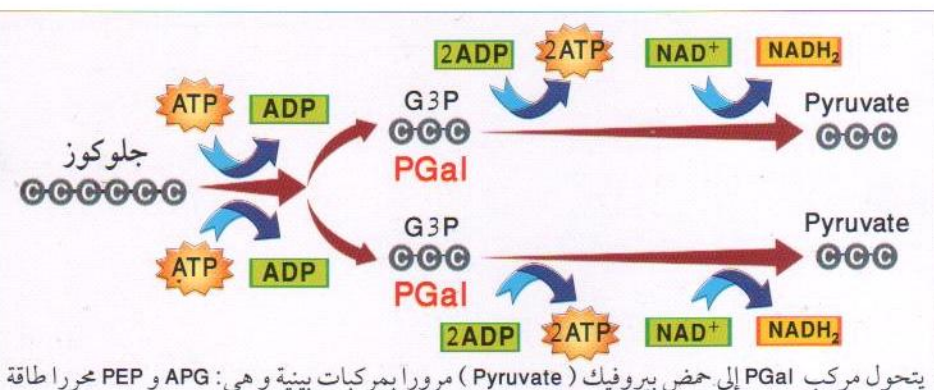
ثانيا تحويل الطاقة الكيميائية الكامنة إلى طاقة كيميائية قابلة للاستعمال (تنفس):

يعني التنفس الآليات التي تسمح بتحويل الطاقة الكيميائية الكامنة في الجلوكوز إلى طاقة كيميائية قابلة للاستعمال من طرف خلايا العضوية. وتتم عملية التحصل على هذه الطاقة إما في وجود الأكسجين حيث يتفكك فيها الجلوكوز كليا (تنفس هوائي)، أو في غيابه حيث يتفكك جزئيا (تنفس لاهوائي أو تخمر).

1 في حالة وجود الأكسجين

يوضح الجدول الموالي بشكل تفصيلي مراحل وشروط هذه الظاهرة على المستوى الجزيئي:

1 إيضاح المظهر الخارجي للعملية وشروط حدوثها	**تذكير بالمكتسبات القبلية:** تتمثل المظاهر الخارجية للتنفس في أخذ الأكسجين من الوسط الخارجي وطرح بالمقابل CO_2 وتحرر طاقة حرارية. وذلك وفق المعادلة التقليدية التالية: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6H_2O + 6CO_2 +$ طاقة
2 المقر والبنية	سلسلة نواقل للإلكترونات ستروما كرية مذنبة الميتوكندري **الميتوكندري:** تحتوي الخلية الحيوانية على كل المكونات فيما عدا الصانعات الخضراء. تتكون الميتوكندري من غشائين : داخلي وخارجي كما يبينه الشكل أعلاه. ينثني الغشاء الداخلي إلى الداخل مشكلا ما يسمى بالإعراف الهدف منها **زيادة سطح الأكسدة التنفسية**. بقية الفراغ يسمى الحشوة أو ستروما وهو عبارة عن سائل يحتوي على مركبات **عضوية وإنزيمات تنفسية** ومرافقات إنزيمية: FAD, NAD و ADP, Pi .... - **ما فوق بنية الميتوكندري** : يتكون الغشاء الداخلي من سلسلة نواقل الالكترونات تسمى **السلسلة التنفسية**، تنتهي بكرية مذنبة (ATPase).
3 معادلة التنفس	تتمثل المعادلة الحديثة للتنفس فيما يلي: $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 12H_2O +$ طاقة (1: من $C_6H_{12}O_6$ إلى $6CO_2$ ؛ 2: من $6O_2$ إلى $12H_2O$) **نستخلص من المعادلة وجود تفاعلين:** 1- تفاعل أكسدة للجلوكوز إلى غاز الفحم يطرح إلى الخارج. 2- تفاعل إرجاع للأكسجين إلى ماء أي أن العملية تتطلب امتصاص الأكسجين من الوسط الخارجي. طبيعة التفاعلات الكيميائية في التنفس هي كذلك تفاعلات أكسدة وإرجاع. لا تتطلب عملية التنفس شروطا خاصة سوى توفر الأكسجين.
4 مراحل التنفس	**أ- التحلل السكري (Glycolyse)** قبل دخول الجلوكوز إلى الميتوكندري تحدث به سلسلة من التحولات تنتهي إلى تشكيل حمض البيروفيك يطلق على الظاهرة **التحلل السكري** والذي يمكن توضيحه وفق مخطط الصفحة الموالية: يتبين من المخطط أن جزيئة الجلوكوز تتجزأ إلى مركبين يتكون كل منهما من ثلاث ذرات كاربون يطلق عليهما PGal (فوسفو غليسيرالدهيد) يتطلب ذلك استعمال طاقة تقدر إجماليا ب 2ATP .



يتحول مركب PGal إلى حمض بيروفيك (Pyruvate) مرورا بمركبات بينية و هي: APG و PEP محررا طاقة تسمح بتشكيل 2ATP وإرجاع $2NAD^+$ إلى $2NADH_2$.

معادلة التحلل السكري: $C_6H_{12}O_6 + 2\,(ADP+Pi) + 2NAD^+ \longrightarrow 2ATP + 2NADH_2 +$ 2 حمض بيرو فيك

ما هو مصير حمض البيروفيك؟

ب- حلقة كريبس

يدخل حمض البيروفيك إلى الميتوكندري بعد أن يرتبط بمرافق الإنزيم COA-SH ليتحول إلى مركب أسيتيل-COA يتم خلالها نزع ثاني أكسيد الكربون وإرجاع NAD^+ إلى NADH2 تسمى العملية نزع الكاربون التأكسدي. ينفصل مرافق الإنزيم عن الأسيتيل ليرتبط هذا الأخير في مستوى الحشوة مع مركب رباعي الكربون مشكلا مركبا سداسيا ليدخل في سلسلة من تفاعلات نزع ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين حتى التفكيك الكلي لمركب الأسيتيل الذي ينتهي بتحرير $2CO_2$ ، ليتحول المركب السداسي من جديد إلى مركب رباعي الكربون ويعيد الدورة من جديد مع مركب أسيتيل آخر كما يوضحه الشكل المقابل. يطلق على العملية **حلقة كريبس** حيث تكون معادلتها كالأتي:

$$Acetyl\text{-}COA + 3NAD^+ + FAD^+ + ADP + Pi \longrightarrow 2CO_2 + 3NADH_2 + FADH_2 + COA\text{-}SH + ATP$$

ج- الفسفرة التأكسدية

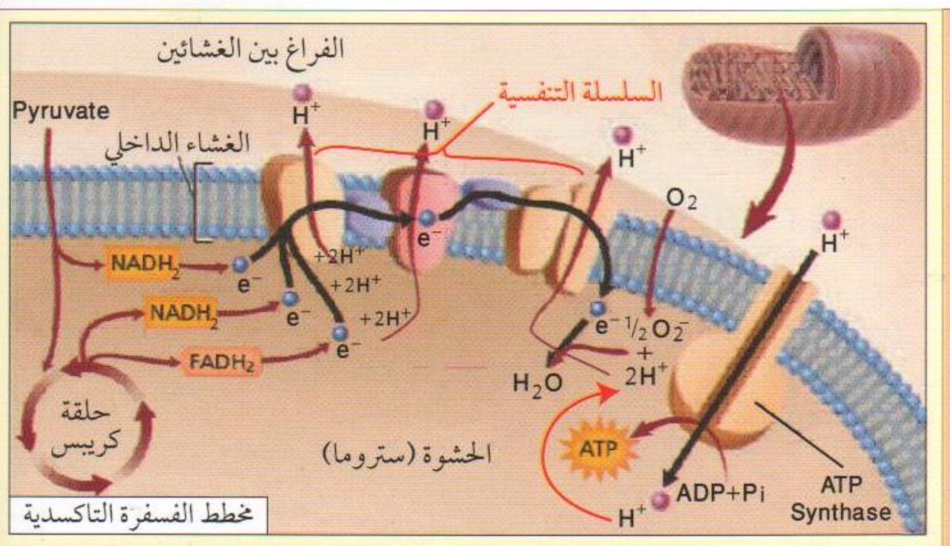
لقد أظهرت التجارب أن NADH2 و FADH2 يتأكسدان عبر سلسلة من النواقل توجد ضمن الغشاء الداخلي للميتاكوندري تسمى **السلسلة التنفسية** حيث تقوم البعض منها باستعمال جزء من طاقة الإلكترونات في ضخ البروتونات إلى الفراغ بين الغشائين بينما ينتهي المطاف بالإلكترونات إلى إرجاع الأكسجين كما يوضحه الشكل في الصفحة الموالية.

يرفق بالسلسلة التنفسية عملية فسفرة تسمى الفسفرة التأكسدية تسمح بتشكيل جزيئ ATP على مستوى الكريات المذنبة حيث تتدفق البروتونات عبرها من الفراغ بين الغشائين العالي التركيز بالبروتونات إلى الستروما لترتبط بجزيئات الأكسجين المرجعة مما يسمح بتركيب جزيئات الماء.

معادلة الفسفرة التأكسدية:

$$6\,O_2 + 10\,NADH_2 + 2\,FADH_2 + 34\,(ADP + Pi) \longrightarrow 12H_2O + 10\,NAD^+ + 2\,FAD^+ + 34\,ATP$$

مراحل التنفس



حصيلة التنفس الهوائي

المرحلة	عدد ATP	عدد NADH2	عدد FADH2
التحلل السكري	2	2	0
نزع الكربون التأكسدي	/	2	0
حلقة كريبس	2	6	2
الحصيلة الإجمالية	4	10	2
الحصيلة الطاقوية بال ATP	4 +	30 + =38 ATP	4

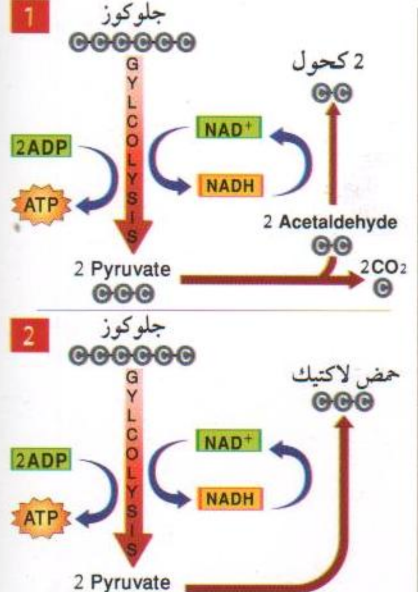
1NADH2 ⟶ 3ATP / 1FADH2 ⟶ 2ATP

2 في حالة غياب الأكسجين

لاحظنا من خلال معادلة التحلل السكري أن من نتائج هذه العملية والتي تتم في الهيولى إرجاع +2NAD إلى $NADH_2$ 2 وتشكل حمض البيروفيك ومن ثم تتأكسد في الميتوكندري لتعطي 3 جزيئات ATP.لكن في غياب الأكسجين فإن العملية تتوقف هنا ويشكل تراكم $NADH_2$ الزيادة من حموضة الوسط نتيجة ارتفاع تركيز البروتونات مما يجعله وسطا غير مناسب للنشاط الإنزيمي. وعند الإنسان تسبب له حموضة الدم (Acidose) التي تؤدي به إلى الموت الحتمي .لهذا تلجأ العضوية إلى التخلص من هذه الحموضة بأكسدة $NADH_2$ إلى NAD^+ وتحويل حمض البيروفيك إما إلى حمض لبن أو كحول وتسمى العملية بالتخمر أو التنفس اللاهوائي وتربح بذلك جزيئتان من ATP الناتجة عن التحلل السكري.

أ- التخمر الكحولي : تلجأ بعض الكائنات الدقيقة مثل فطر الخميرة إلى هذا النوع من التخمرات إلى تحويل حمض البيروفيك أولا إلى مركب أسيتالدهيد بنزع جزيئة ثاني أكسيد الكاربون ثم إرجاع هذا المركب إلى كحول عن طريق $NADH_2$ كما يبين ذلك المخطط 1. يستفاد من هذا النوع من التخمرات في صناعة أنواع الخبز و الكحول الذي يستعمل في صناعة مختلف أنواع الخمر كما يستعمل كمطهر في المجال الطبي ...

ب- التخمر اللبني (التخمر اللاكتيكي) : نفهم جيدا معنى التخمر اللبني عندما نذكر بعض مشتقات الحليب التي نحبها مثل الياهورت والجبن واللبن والرايب وجبن البيتزا (Cheddar)...والتي هي منتوج نشاط بكتيريات تعيش في الحليب،حيث تقوم بتحويل حمض البيروفيك إلى حمض لبن وفق المخطط 2 .نلاحظ كذلك حدوث التخمر اللبني عند الإنسان في حالة القيام بجهد عضلي قوي حيث تصبح كمية الأكسجين الموجودة في الدم غير كافية لمسايرة الجهد العضلي وبالتالي لا تحدث أكسدة تامة للجلوكوز في الميتوكندري، ونتيجة تراكم $NADH_2$ فإن ذلك يؤدي إلى خطر حموضة الدم لذلك تلجأ الخلايا العضلية إلى التخمر اللبني والذي يؤدي إلى تراكم حمض اللبن فيتسبب في شبه شلل مؤقت وألم حاد للعضلات عند القيام بأدنى حركة خاصة في اليوم الموالي للجهد العضلي القوي.يزول هذا المشكل العضلي تدريجيا بعد تحويل حمض اللبن من طرف الكبد إلى حمض البيروفيك من جديد.



ج- الحصيلة الطاقوية للتخمر: ما دام مركب $NADH_2$ لا يتأكسد في الميتوكندري وأن التنفس يتوقف عند التحلل السكري،لذلك فإن الحصيلة الطاقوية لهذه الظاهرة تتمثل فقط في 2ATP.

- لماذا استعمال ATP كمصدر للطاقة بدلا من أي مركب آخر ؟

حسب تسميته أدينوزين ثلاثي الفوسفات (Adénosine Triphosphate)، يتركب من الأدينوزين (سكر ريبوز + أدينين) مرتبط بثلاثة أحماض فوسفورية على التسلسل كما يوضحه الشكل ادناه.وهو أحسن مركب حامل للطاقة تستعمله جميع الكائنات الحية حيث عند تفكك مول واحد منه يحرر طاقة تقدر ب: 30.5 كيلوجول.وهذه الطاقة تأتي أساسا من عملية الفسفرة التأكسدية والتي تتم في مستوى الغشاء الداخلي للميتوكندري.فعند عبور البروتونات عبر الكريات المذنبة تتحرر طاقة عالية جدا لا يمكن لأي مركب أن يقتنصها بمردود عالي إلا ATP انطلاقا من ADP + Pi.حيث تكون الروابط بين جزيئات الفوسفات غنية بالطاقة.لذلك يعتبر المورد الأساسي لكل التفاعلات البيوكيميائية التي تحتاج إلى طاقة.

روابط غنية بالطاقة

3 المردود الطاقوي

يتمثل المردود الطاقوي ما تستفيده الخلية من طاقة فعلية في شكل ATP من الطاقة الكلية الكامنة في الجلوكوز. حيث يتم قياس ذلك بالنسبة المئوية.

إن الحرق الكلي (الأكسدة التامة) لمول واحد من سكر الجلوكوز خارج العضوية يحرر طاقة حرارية تقدر ب 2861 كيلو جول وذلك وفق المعادلة التقليدية:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + E\ (2860\ Kj\ /\ mol)$$

أما الأكسدة التامة لنفس الكمية من الجلوكوز داخل الخلية فتعطي 38 ATP. بما أن مول ATP يعطي 30.5 كيلوجول أي تستفيد الخلية من 38 x 30.5 = 1159 كيلوجول. وهذا يعني أن المردود الطاقوي للخلية يساوي :

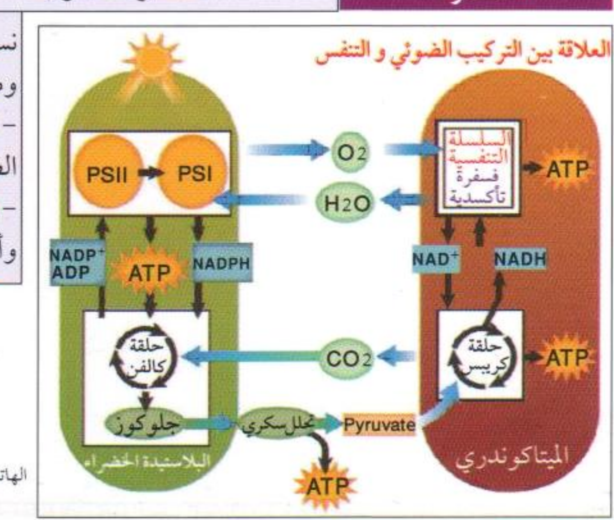
$$1160\ /2860 \times 100 = 40.5\ \%$$

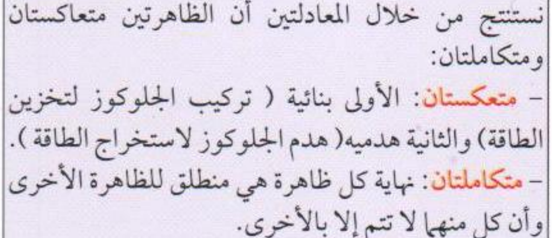
و بالتالي فإن ما تستعمله الخلية فعليا من الجلوكوز هو فقط 40.5 ٪ والباقي (Kj1700) يطرح في شكل إشعاع حراري يستفيد منه الجسم في تثبيت درجة حرارته.وهو يعتبر أحسن مردود طبيعي مقارنة مع المردود الطاقوي لمحركات السيارات والتي تذهب معظم الطاقة المستخرجة من البنزين في شكل حرارة تزيد من تسخين المحركات لهذا يستعمل فيها نظام التبريد. في حين أن الميتوكندري تستخرج هذه الطاقة ببطء وفي ظل حرارة معتدلة بفضل عمل الإنزيمات.

خلاصة المجال الثاني: ما مصدر الطاقة الكامنة ؟ وكيف يتم تحويلها في شكل ATP؟

يلخص الجدول التالي مقارنة بين الظاهرتين، يتبع برسم تخطيطي يبرز العلاقة بينهما.

المواصفات	التركيب الضوئي	التنفس
المقر	الغشاء الداخلي للتيلاكويد	الغشاء الداخلي للميتاكوندري
التفاعلات الكيموحيوية	$6CO_2 + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6\ H_2O$	$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 6\ H_2O \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O + E$
مرافقات الإنزيم المرجعة	$NADP^+$	NAD^+ أساسا ثم FAD^+
سلسلة نواقل الالكترونات	السلسلة التركيبية الضوئية	السلسلة التنفسية
الفسفرة	الفسفرة الضوئية	الفسفرة التأكسدية





نستنتج من خلال المعادلتين أن الظاهرتين متعاكستان ومتكاملتان:

- متعكستان: الأولى بنائية (تركيب الجلوكوز لتخزين الطاقة) والثانية هدميه(هدم الجلوكوز لاستخراج الطاقة).
- متكاملتان: نهاية كل ظاهرة هي منطلق للظاهرة الأخرى وأن كل منهما لا تتم إلا بالأخرى.





حي الكثبان، عمارة أ، مدخل 10 محل 23، المحمدية، الجزائر.
الهاتف: 15 00 82 021 / 37 96 82 021، الناسوخ: 37 96 82 021.
البريد الإلكتروني: clicedition@gmail.com